

# 양자 확장의 핵심 난제에 대한 SQC 연구 심층 분석

(2026.01.05., 양자정보연구지원센터)

## □ 양자 확장의 핵심 난제에 대한 SQC 연구 심층 분석

### ○ 연구 개요

- 본 연구는 실리콘(Si) 내에 정밀 배치된 인(P) 원자를 기반으로 한 11큐비트 양자 프로세서를 구현하고, 다수의 큐비트 레지스터를 연결하면서도 양자 오류 보정에 필요한 성능 기준을 유지했음을 보고함
- 기존 양자컴퓨팅의 난제였던 “규모 확장 시 성능 저하” 문제를 정면으로 다루며, 실리콘 기반 양자컴퓨팅의 실현 가능성을 강화함

### ○ 연구의 핵심 성과

- 고품질 소형 모듈(레지스터)을 연결하는 모듈형 확장 전략을 통해 성능 저하 없는 확장을 입증함
- 4개 및 5개의 핵스핀 큐비트로 구성된 두 개의 레지스터를 전자 스핀을 매개로 연결
- 총 11큐비트(핵스핀 9개 + 전자스핀 2개)로 구성된 프로세서 구현
- 큐비트 수 증가가 반드시 잡음 증가로 이어지지 않음을 실험적으로 입증

### ○ 큐비트 구성 및 물리적 기반

- 실험 시스템은 “동위원소 정제 실리콘-28(Si-28)” 에 인 원자를 원자 단위 정밀도로 배치하여 제작됨
- 각 인 원자의 “핵스핀(nuclear spin)” 이 하나의 큐비트 역할 수행
- 핵스핀 큐비트는 외부 잡음에 강하고, 양자 상태를 장시간 안정적으로 유지 가능
- 레지스터 내에서는 하나의 전자 스핀이 여러 핵스핀과 결합하여 연산 및 관독을 매개

### ○ 레지스터 간 연결 방식

- 두 레지스터는 각각의 전자 스핀 사이의 “교환 결합(exchange coupling)” 을 통해 연결됨
- 전기 게이트를 이용해 전자 간 상호작용 세기를 정밀 제어
- 빠른 연산이 가능하면서도 불필요한 간섭을 최소화하는 영역에서 동작
- 전자 스핀은 빠른 보조 큐비트(ancilla) 및 연결자 역할을 수행
- 성능 및 오류 보정 관점의 의미
  - 본 시스템은 “오류 허용 임계값(fault-tolerant threshold)” 을 상회하는 높은 충실도(fidelity)를 달성함
  - 단일 큐비트 게이트: 최대 99.99%
  - 핵스핀 간 2큐비트 게이트: 약 99.9%
  - 레지스터 간 연산(전자 매개): 99% 이상
  - 시스템 규모가 커졌음에도 기존 소형 시스템 대비 성능이 유지되거나 일부 개선됨
- 얽힘(Entanglement) 및 연결성 검증
  - 프로세서 내 임의의 두 핵스핀 큐비트 간 얽힘 생성이 가능함을 입증
  - 레지스터가 달라도 얽힘 생성 가능
  - Bell 상태 및 다중 큐비트 GHZ 상태 생성 성공
  - 최대 8개 핵스핀 큐비트에 걸친 진정한 다체 얽힘 유지 확인
- 제어 및 보정의 확장성
  - 다수의 큐비트를 제어하기 위한 확장 가능한 보정(calibration) 전략을 제시함
  - 다수의 마이크로파 주파수 제어가 필요하나, 레지스터 내 주파수 이동이 집단적으로 발생
  - 소수의 측정만으로 전체 레지스터 재보정 가능
  - 대규모 시스템 운용 시 실용성을 높이는 핵심 요소로 평가됨
- 실리콘 기반 접근의 의미

- 실리콘은 기존 반도체 산업의 핵심 소재로, 제조·설계·공급망 인프라 활용 가능성이 큼
  - 인-실리콘 시스템은 금속 제어 구조를 최소화하여 잡음과 간섭 감소
  - 초전도, 이온트랩, 중성원자 방식 대비 공정 통합 측면에서 잠재적 장점 보유
  - 산업적 확장 가능성이 높은 양자 플랫폼으로 평가됨
- 한계 및 향후 과제
- 아직 실용적 양자컴퓨터로 가기까지는 해결해야 할 과제가 존재함
  - 일부 실험에서 “포스트 셀렉션(post-selection)”에 의존 → 대규모 시스템에는 부적합
  - 제어 자동화, 크로스토크, 주파수 혼잡, 원자 배치 편차 문제 해결 필요
  - 핵스핀 큐비트의 상대적으로 느린 연산 속도는 구조적 트레이드 오프 요소
  - 다중 레지스터에 걸친 완전한 양자 오류 보정 프로토콜은 아직 미구현
- 의미와 전망
- 본 연구는 “큐비트 수 경쟁”에서 벗어나 고품질 모듈 간 연결이라는 새로운 확장 패러다임을 제시함
  - 신뢰도 높은 소형 유닛을 연결하는 방식은 고전 컴퓨팅의 발전 경로와 유사
  - 실리콘 기반 양자컴퓨팅이 오류 보정이 가능한 대규모 시스템으로 확장될 수 있음을 실증적으로 보여줌
  - 향후 양자컴퓨팅 아키텍처 설계 논의에 중요한 기준점을 제공하는 연구로 평가됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/12/18/inside-sqcs-research-on-a-key-quantum-scaling-problem/>